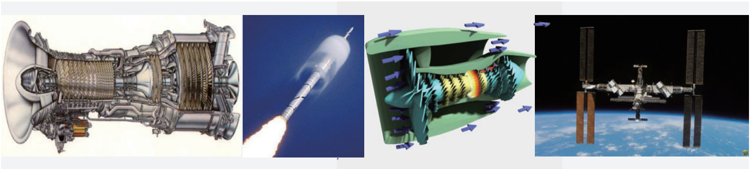
热工基础 之

第9章　对流传热



机械与动力工程学院

曹　　军

2020年11月

内容

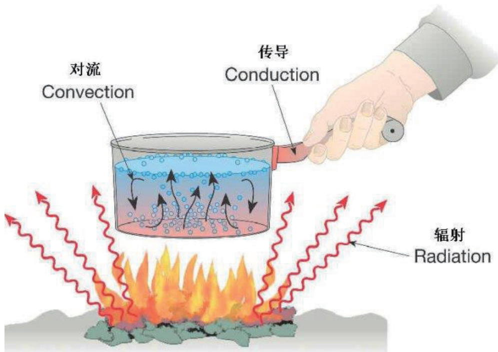
热工基础 之 传热学

9-1

对流传热的基本概念

对流传热

对流传热：流体流过固体表面时流体与固体间的热量交换



对流传热的分类

对流换热
- 无相变换热
  - 受迫对流换热
    - 内部流动
      - 圆管内受迫流动
      - 非圆形管内受迫流动
    - 外部流动
      - 外掠平板
      - 外掠单管
      - 外掠管束（光管；翅片管）
  - 自然对流换热
    - 无限空间
      - 竖壁；竖管
      - 横管
      - 水平壁（上表面和下表面）
    - 有限空间——夹层空间
  - 混合对流换热（受迫对流与自然对流并存）
- 相变换热
  - 凝结换热
    - 垂直壁凝结换热
    - 水平单圆管及管束外凝结换热
    - 管内凝结换热
  - 沸腾换热
    - 大空间沸腾换热
    - 管内沸腾换热（横管，竖管）

对流传热的基本计算理论

传热方程

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta t$$

传热量　传热系数　传热面积　冷热流体平均温差

牛顿冷却公式(Newton's Law of cooling)

$$\Phi = h \cdot A \cdot \Delta t$$

h：　表面传热系数(Convective heat transfer coefficient)

又称 对流换热系数，单位：$W/(m^2 \cdot K)$

Δt：温差，恒取正值，　A：对流换热面积

对流传热系数的影响因素

- 对流换热系数的大小与对流换热过程的诸多因素相关;
- 影响因素：流体物性、换热表面的形状、大小与布置、流速等。

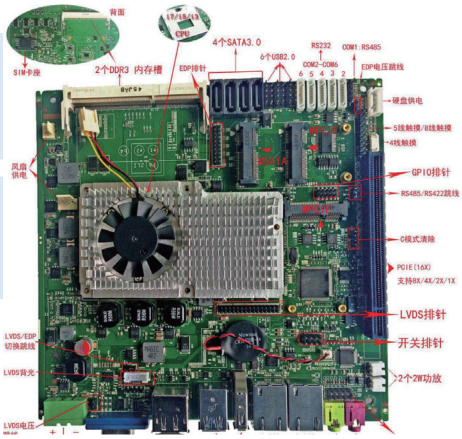
> 流体流动的起因
> 流体有无相变
> 流体的流动状态
> 换热表面的几何因素
> 流体的物理性质

对流传热系数的影响因素-流动起因

自然对流：流体因各部分温度不同而引起的密度差异所产生的流动

强制对流：由外力（如：泵、风机、水压头）作用所产生的流动

$$h_{强制} > h_{自然}$$



对流传热系数的影响因素-流体有无相变

- **单相换热**
- **相变换热（凝结、沸腾、升华、凝固、融化等）**

> 单相吸热：4.2 kJ/kg
> 沸腾时的汽化潜热：2260 kJ/kg

$$h_{相变} > h_{单相}$$

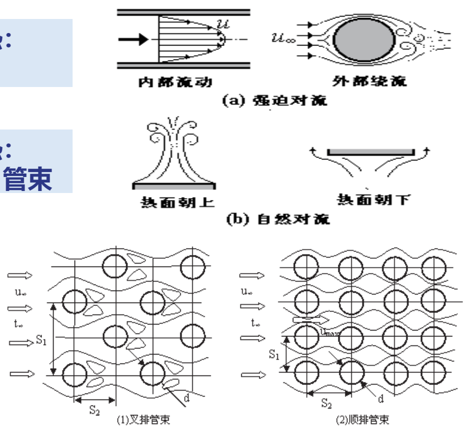
对流传热系数的影响因素-流动状态

$$h_{湍流} > h_{层流}$$

对流传热系数的影响因素-换热表面的几何因素

内部流动对流换热：管内或槽内

外部流动对流换热：外掠平板、圆管、管束



对流传热系数的影响因素-流体的物理性质

热导率 $\lambda\,[\mathrm{W/(m\cdot{}^\circ C)}]$　　密度 $\rho\,[\mathrm{kg/m^3}]$

比热容 $c\,[\mathrm{J/(kg\cdot{}^\circ C)}]$　　动力粘度 $\eta\ [\mathrm{N\cdot s/m^2}]$

运动粘度 $\nu=\eta/\rho\ \ [\mathrm{m^2/s}]$

$\lambda\uparrow\Rightarrow h\uparrow$ (流体内部和流体与壁面间导热热阻小)

ρ、$c\uparrow\Rightarrow h\uparrow$ (单位体积流体能携带更多能量)

$\eta\uparrow\Rightarrow h\downarrow$ (有碍流体流动、不利于热对流)

对流传热系数的影响因素

综上所述，表面传热系数是众多因素的函数：

对于单相强制对流，表面传热系数可表示为：

$$h = f(\vec{v}, t_w, t_f, \lambda, c_p, \rho, \alpha, \eta, l)$$

对流传热的研究方法

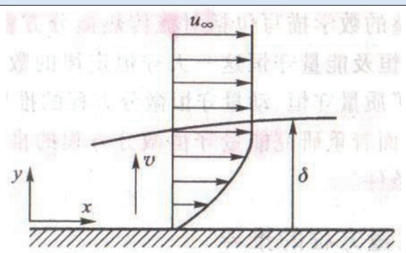
分析法　实验法

比拟法　数值法

理论分析、数值计算和实验研究相结合是目前被广泛采用的解决复杂对流换热问题的主要研究方式。

对流传热系数与流体温度场之间的关系

- 当粘性流体在壁面上流动时，由于粘性的作用，在贴壁处被滞止，处于无滑移状态（即：y=0，u=0）
- 在这极薄的贴壁流体层中，热量只能以导热方式传递



壁面附近速度分布示意图

表面传热系数与流体温度场之间的关系

根据傅里叶定律： $q = -\lambda \left.\dfrac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=0}$

$(\partial t/\partial y)\big|_{y=0}$ 为贴壁处壁面法线方向上的流体温度变化率

λ 为流体的导热系数

将牛顿冷却公式与上式联立，得到对流换热过程的微分方程式

$$h = -\frac{\lambda}{\Delta t}\left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=0}$$

结论：h 取决于流体导热系数、温度差和贴壁流体的温度梯度

热工基础 之 传热学

9-2

对流传热的基本方程组

对流传热问题的数学描写

对流传热问题的数学描写 = 对流传热微分方程组 + 定解条件

- 质量守恒方程
- 动量守恒方程
- 能量守恒方程

流体力学

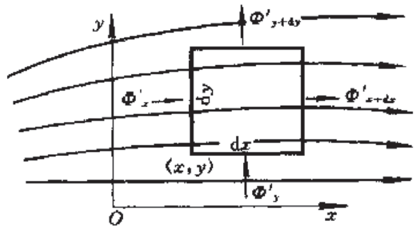
传热学

运动流体能量方程的推导

简化假设

- 流动为二维流动。
- 流体为不可压缩性的牛顿流体。
- 流体的物性参数为常数，流体无内热源。
- 忽略粘性耗散产生的耗散热。

微元体能量收支平衡的分析



开口系统的能量守恒，则导入微元体的热流量

$$\Phi=\frac{\partial U}{\partial \tau}+(q_m)_{out}\left(h+\frac{1}{2}v^2+gz\right)_{out}-(q_m)_{in}\left(h+\frac{1}{2}v^2+gz\right)_{in}+W_{net}$$

动能位能变化忽略，流体不做功

$$\Phi=\frac{\partial U}{\partial \tau}+(q_m)_{out}h_{out}-(q_m)_{in}h_{in}\qquad \text{J/s}$$

微元体能量收支平衡的分析

第一项

导热进入微元体的热量，对于二维问题，在$d\tau$时间内：

$$\Phi d\tau=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)dxdyd\tau$$

第二项

热力学能的增量：

$$\Delta U=\rho c_p dxdy\frac{\partial t}{\partial \tau}d\tau$$

微元体能量收支平衡的分析

第三项 $(q_m)_{out}h_{out}-(q_m)_{in}h_{in}$ **J/s**

$$H_x=\rho c_p utdyd\tau$$

$$H_{x+dx}=\rho c_p\left(t+\frac{\partial t}{\partial x}dx\right)\left(u+\frac{\partial u}{\partial x}dx\right)dyd\tau$$

$$H_{x+dx}-H_x=\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+t\frac{\partial u}{\partial x}\right)dxdyd\tau$$

$$H_{y+dy}-H_y=\rho c_p\left(v\frac{\partial t}{\partial y}+t\frac{\partial v}{\partial y}\right)dxdyd\tau$$

微元体能量收支平衡的分析

单位时间内由于流体的流动而带出微元体的净热量

$$(q_m)_{out}h_{out}-(q_m)_{in}h_{in}=\rho c_p\left[\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\left(t\frac{\partial u}{\partial x}+t\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]dxdy$$

$$=\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}\right)dxdy$$

微元体能量收支平衡的分析

二维常物性无内热源能量微分方程

$$\rho c_p\left(\frac{\partial t}{\partial \tau}+u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$$

非稳态项　对流项　扩散项

- 热量的传递一方面由于流体的宏观位移所致，同时，与固体之间的热交换时通过固体壁面附近流体的导热来进行。
- 正是这两种热量传递的机制不可分割的共同作用，造成了流体的对流传热过程。

对流传热问题完整的数学描写- 微分方程组

对于不可压缩、常物性、无内热源的二维问题，微分方程组

质量守恒方程 $$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

动量守恒方程 $$\rho(\frac{\partial u}{\partial \tau}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y})=F_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\eta(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2})$$

$$\rho(\frac{\partial v}{\partial \tau}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y})=F_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\eta(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2})$$

能量守恒方程 $$\frac{\partial t}{\partial \tau}+u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}=\frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$$

对流传热问题完整的数学描写-定解条件

初始条件

初始时刻的速度，压力及温度场分布

边界条件

说明所研究的对流换热在边界上的状态（如边界上的速度分布和温度分布规律）以及与周围环境之间的相互作用。

参数设置

说明对流换热表面的几何形状、尺寸，壁面与流体之间的相对位置，壁面的粗糙度等。

说明流体的物理性质，例如给出热物性参数的数值及其变化规律等。此外，物体有无内热源以及内热源的分布规律等也属于参数的范畴。

热工基础 之 传热学

9-3

相似原理

相似现象

飞机的风洞实验

相似原理

问题的提出

试验是不可或缺的手段，然而，经常遇到如下两个问题：

(1) 变量太多 $h=f(\vec{v},t_w,t_f,\lambda,c_p,\rho,\alpha,\eta,l)$

A 实验中应测哪些量（是否所有的物理量都测）

B 实验数据如何整理（整理成什么样函数关系）

(2) 实物试验很困难或太昂贵的情况，如何进行试验？

相似原理

相似原理

相似原理的产生背景

在减少实验次数的前提下，获得具有通用性的规律。

相似原理的定义

- 对于两个同类的物理现象，如果在相应的时刻以及相应的地点上，与现象有关的物理量一一对应成比例，则称此两现象彼此相似。
- 凡相似的物理现象，其物理量的场一定可以用一个统一的无量纲的场来表示。

相似原理的几个特点

1 只有同类现象才能谈论相似问题

2 与现象有关的物理量要一一对应成比例

3 对非稳态问题，要求在相应的时刻各物理量的空间分布相似

相似原理的基本内容

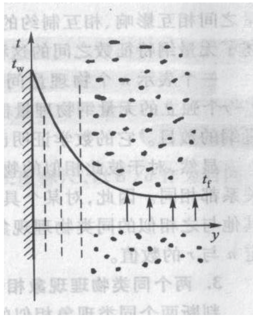
凡是彼此相似的现象，描写该现象的同名特征数(即准则数)对应相等。

$$h\left(t_w - t_f\right) = -\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0}$$

以 $t_w - t_f$ 作为**温度标尺**，以换热面的某一特征尺寸 l 作为**长度标尺**。

$$\frac{hl}{\lambda} = \left.\frac{\partial\left[\left(t_w - t\right)/\left(t_w - t_f\right)\right]}{\partial\left(y/l\right)}\right|_{y=0}$$

无量纲温度场在壁面上的梯度



壁面附近的流体温度分布

相似原理的基本内容

相似现象**无量纲的同名物理量的场**是相同的。

$$\left(\frac{hl}{\lambda}\right)_1 = \left(\frac{hl}{\lambda}\right)_2$$

$$Nu_1 = Nu_2$$

➢ **相似对流传热现象的Nu数相等。**

同一现象中相似特征数的数量及其间的关系 -π定理

➢ 一个表示n个物理量间关系的量纲一致的方程式，一定可以转换成包含 n-r 个独立的**无量纲物理量群**间的关系式。

➢ r 是 n 个物理量中所涉及到的**基本量纲**的数目。

➢ 对于彼此相似的物理现象，这个无量纲数群(相似特征数群)间的关系都相同。

➢ 对某个**具体的物理过程**所获得的特征数方程也适用于所有其他与之相似的同类物理现象。

两个同类物理现象相似的充要条件

1 同名的已定特征数相同

➢ 已定特征数： 由所研究问题的已知量组成的特征数。

2 单值条件相似

➢ 初始条件

➢ 边界条件

➢ 几何条件

➢ 物理条件

导出相似特征数的两种方法- 相似分析法

➢ 一个物理现象中的各个物理量不是单个独立地起作用的，而是与其他物理量之间相互影响，相互制约的。

➢ 描写该物理现象的微分方程组及定解条件就给出了这种相互影响与制约所满足的基本关系。

热工基础 之 传热学

9-3

单相流体管内强迫对流传热特征数关联式

内部流动与外部流动的区别

- 外部流动中，换热壁面上的流体边界层可以自由地发展，不会受到流道壁面的阻碍或者限制。因此，外部流动中往往存在一个边界层以外的区域，此区域中无论速度梯度还是温度梯度都可以忽略。

- 内部流动中，换热壁面上边界层的发展受到流道壁面的限制，因此换热规律与外部流动有明显的区别。

管槽内强制对流流动与换热的特点

1 两种流态

2 入口段与充分发展段

3 两种典型的热边界条件- 均匀热流与均匀壁温

4 流体平均温度及 流体与壁面的平均温度

特点①-两种流态层流与湍流

特点①-两种流态

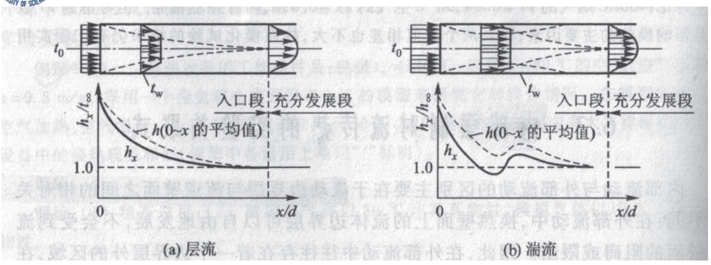
$$\mathrm{Re} = \frac{ul}{\nu}$$

$\mathrm{Re} < 2300$	层流
$2300 \le \mathrm{Re} \le 10000$	过渡区
$\mathrm{Re} > 10000$	旺盛湍流

特点②-入口段与充分发展段

- 当流体从大空间进入一根圆管时，流动边界层有一个从零开始增长，直到汇合于管子中心线的过程；
- 与之类似，当流体与管壁之间有热交换时，管子壁面上的热边界层也有一个从零开始增长直到汇合于管子中心线的过程。

特点②-入口段与充分发展段

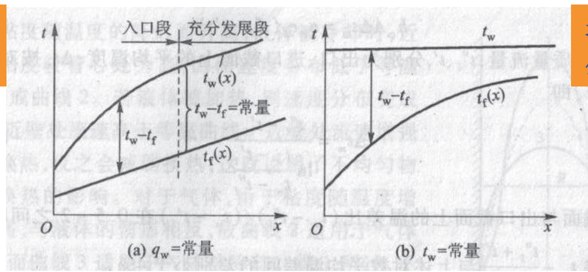


- 流动边界层及热边界层汇合于管子中心线之后称为流动或者换热已经充分发展（Fully developed），此后换热强度保持不变。
- 从进口到充分发展段之间的区域称为入口段(Entrance region)。

特点③-均匀热流与均匀壁温

- 轴向与周向热流密度均匀，称为均匀热流（Uniform heat flux）
- 轴向与周向壁温均匀，称为均匀壁温（Uniform wall temperature）

均匀热流



均匀壁温

流体平均温度与壁面温度的沿程变化

特点④- 流体平均温度以及流体与壁面的平均温差

截面上流体的平均温度(定性温度)

$$t_f=\frac{\int_{Ac} c_p \rho t u dA}{\int_{Ac} c_p \rho u dA}$$

流体与壁面的平均温差

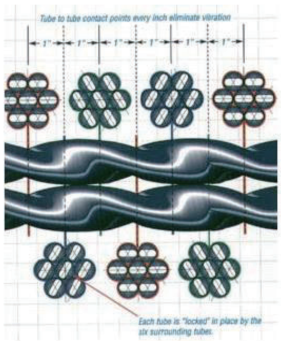
均匀热流(充分发展段)

$$\Delta t_m = t_w - t_f$$

均匀壁温

$$\Delta t_m=\frac{t_f''-t_f'}{\ln\frac{t_w-t_f'}{t_w-t_f''}}$$

管槽内湍流



管槽内湍流强制对流传热关联式—常规流体，Pr>0.6

圆形直管内的湍流　　Dittus-Boelter公式

$$Nu = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{n}$$

使用范围：

Re>10000，0.7<Pr<120，μ<2×10^{-3}Pa.s，$l/d \geq$ 60

注意事项：

(1) 定性温度取流体进出温度的算术平均值t_m;
(2) 特征尺寸为管内径d;
(3) 流体被加热时，n=0.4，流体被冷却时，n=0.3。

管槽内湍流强制对流传热关联式

非圆形截面

当量直径

$$d_e=\frac{4A_c}{P}$$

管槽内湍流强制对流传热关联式 － Gnielinski公式

Thank you!